طراحی و ساخت دستگاه آزمایش فرسایش داخلی و ریزشویی در خاک‌ها *

پیلتن طباطبایی شوریجه[۱] عباس سروش[۲]

چکیده *فرسایش داخلی از اصلی‌ترین علل خرابی و ناکارآمدی سدهای خاکی و سنگریزه‌ای می‌باشد. یکی از پیچیده‌ترین سازوکارهای فرسایش داخلی، ریزشویی است که به‌ویژه در پی‌های آبرفتی سدها امکان وقوع دارد. در این مقاله دستگاه آزمایش تراوش پیشرفته و بزرگ مقیاسی که برای بررسی فرسایش داخلی و ریزشویی طراحی و ساخته شده معرفی می‌گردد. این دستگاه توانایی اعمال سربار و برقراری جریان تراوش یک‌بعدی با کنترل گرادیان بر نمونه‌ی مورد آزمایش را دارد. علاوه بر تشریح مشخصات فنی دستگاه و آماده‌سازی نمونه، خلاصه‌ای از نتایج آزمایش‌های پایه برای نمایش قابلیت‌های عملکردی دستگاه ارائه شده‌است. چهار نمونه خاک، با تمرکز بر میزان فرسایش، تغییرات دانه‌بندی و رفتار کرنش حجمی- تخلخل در اثر ریزشویی، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایش‌های مقدماتی ضمن تنویر پدیده‌ی ریزشویی نشان می‌دهد که وقوع ریزشویی باعث کاهش حجم و هم‌زمان افزایش تخلخل خاک شده و میزان فرسایش از توده‌ی خاک در ریزشویی متناسب با شاخص پایداری داخلی می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی فرسایش داخلی، ریزشویی، خاک‌های ناپایدار داخلی، تراوش.

Design and Development of an Apparatus for Internal Erosion and Suffusion Testing in Soils

P. Tabatabaie Shourijeh A. Soroush

Abstract *Internal erosion is a major cause of failure and damage in embankment dams. A complicated and detrimental mechanism of internal erosion is the suffusion process. This paper presents a recently developed automated large scale permeameter for internal erosion and suffusion testing. The new apparatus is capable of applying surcharge loads to the specimen while maintaining a unidirectional gradient controlled seepage flow via a computer closed-loop system. The instrumentation and transducers available continuously measure deformation, pore pressure variation and stress levels throughout the specimen. Multistage commissioning tests on four soils samples are reported that illustrate the novel features of the permeameter and instrumentation. The preliminary results highlight the suffusion process while revealing that the amount of erosion is proportional to the stability index, and soils experiencing suffusion undergo volume reduction conjoined with increasing void ratio.*

Key Words Internal Erosion, Suffusion, Internally Unstable Soils, Seepage

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۱/٤/۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۱۰/۱ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

(۲) نویسنده‌ی مسئول، دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

مقدمه

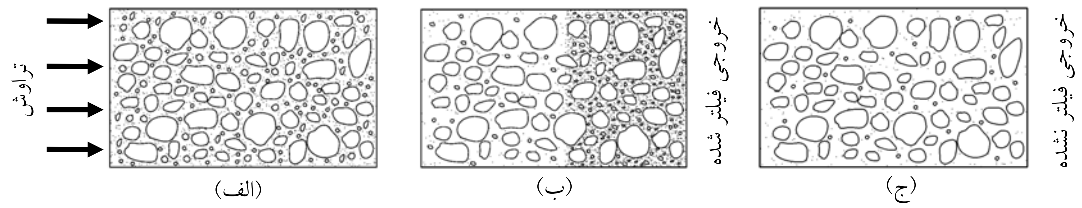
فرسایش داخلی عبارت است از حمل تـدریجی ذرات ریز خاک توسط جریان آب از میـان تـرک‌هـا و منافـذ خاک. ابتدا دبی جریان کم اسـت و ذرات ریزتـر را بـا خود حمل می‌کند ولی به‌تـدریج و بـا گذشـت زمـان، مجرای عبور آب بـزرگ‌تـر مـی‌شـود، در نتیجـه دبـی جریـان زیـادتر مـی‌گـردد و آب قابلیـت حمـل ذرات بزرگ‌تر را خواهد داشت. فرسایش داخلـی مشـکلات فراوانی را برای سازه‌های خاکی بـه‌خصـوص سـدهای خاکی و سنگریزه‌ای به‌وجود می‌آورد. مطـابق آمارهـای موجود تا سال ۱۹۸۶، ۴۸٪ از تخریب سدهای خاکی و سنگریزه‌ای بزرگ بر اثر فرسایش داخلـی و آبشسـتگی بوده است [1]. به‌طور کلی تمامی انواع فرسایش داخلی از سه مکـانیزم اصـلی فرسـایش آغـاز مـی‌گردنـد کـه عبارتنـــد از؛ فرســـایش عقـــب‌رونـــده (Backward Erosion)، فرســـایش بـــر اثـــر تـــراوش متمرکـــز (Concentrated Leak) و ریزشویی (Suffusion).

ریزشویی فرآیندی از فرسایش داخلـی اسـت کـه شامل فرسایش انتخابی ذرات ریز از ساختار یا تـوده‌ای از خاک متشکل از دانه‌های درشـت اسـت. ذرات ریـز به‌واسطه‌ی جریان از میان منافذ و حفرات موجود بـین دانه‌های درشت فرسایش می‌یابند و در نتیجه ساختاری متشکل از دانه‌های درشت بر جای می‌ماند. شـکل (۱) حالت‌های ممکن بـرای ریزشـویی در المـان خـاک را نشان می‌دهد. در حالتی کـه ذرات ریـز فرسـایش‌یافتـه مسیری را در توده‌ی خاک طی کنند و متوقـف شـوند، ریزشویی داخلی (Internal Suffusion) روی می‌دهـد؛ در صورتی که این ذرات از توده خـاک خـارج شـوند، ریزشویی خارجی (External Suffusion) خواهـد بـود [2, 3]. خاک‌هایی که پتانسیل وقـوع ریزشـویی دارنـد، ناپایدار داخلی (Internally Unstable) هستند.

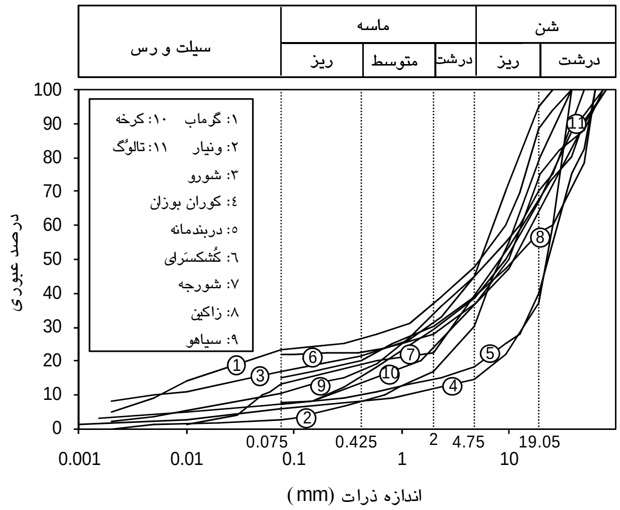
خاک‌های گسسـته بـه‌علـت انفصـال در انـدازه‌ی ذرات و خاک‌های گسترده مقعر به بالا بـه‌دلیـل صـاف بودن انتهای ریزدانه و کمبود اندازه‌ی ذرات ریزتـر، در معرض ناپایداری داخلی هستند. این‌چنین خـاک‌هـایی در نهشته‌های طبیعی خـاک‌هـای رسـوبی، یخچـالی و دریایی ظهور می‌کننـد. بسـیاری از سـدهای در دسـت طراحی یا اجرا در ایران بر روی بسترهای آبرفتی واقـع می‌گردند. مطابق شکل (۲)، دانـه‌بنـدی‌هـای مقعـر بـه سـمت بـالا و گسسـته، کـه ممکـن اسـت در معـرض ریزشویی باشند، در پـی‌هـای آبرفتـی سـدهای کشـور فراوان هستند. از اصلی‌تـرین مشخصـه‌هـای رسـوبات آبرفتـــی مـــی‌تـــوان بـــه نـــاهمگنی (Heterogenity) و ناهمسانی (Anisotropy) آن‌ها اشاره کـرد. در عمـق و سطح نهشته‌های آبرفتی، مصالح با خواص ژئـوتکنیکی (نظیر دانه‌بندی، نفوذپذیری، ...) متفاوتی یافت می‌شود. وجود لایه‌بندی‌ها، لنزها و لایه‌های پراکنده ریزدانـه یـا درشت‌دانه در آبرفت‌ها، موجب پیچیدگی‌های فراوانـی به‌لحاظ رژیم تراوش در پی سدهای خـاکی مـی‌شـود. تمرکز خطوط هم‌پتانسیل و ایجاد گرادیان‌های موضعی شدید از جمله عواملی است کـه بـه شـروع فرسـایش داخلی و ریزشویی در پی کمک می‌کند [٤].

به‌علت پیچیدگی ذاتی فرسایش داخلی و بـه‌ویـژه ریزشویی، که شامل مهاجرت ذرات در محیط متخلخل هستند، استفاده از مطالعات آزمایشگاهی همـواره یکـی از کارآمدترین ابزار بررسی این پدیده‌هـا مـی‌باشـد. در سال‌های اخیر تحقیقات آزمایشـگاهی قابـل‌تـوجهی در سطح بین‌المللی در ارتبـاط بـا ریزشـویی و ناپایـداری داخلی خاک ها صورت گرفته است [5,6,7,8].

با توجـه بـه تعـدد روزافـزون سـدهای خـاکی و سـنگریزه‌ای در دسـت طراحـی و اجـرا در کشـور و اهمیت انجام مطالعات پایه بر روی فرسایش داخلـی و ریزشویی، اقدام به طراحی، ساخت و راه‌اندازی دستگاه آزمایش ریزشویی و فرسایش داخلـی بـا قابلیـت‌هـای پیشرفته شده است. در این مقاله ضـمن معرفـی کامـل دسـتگاه و توانمنـدی‌هـای اجـزای مختلـف آن، روش انجام آزمایش و بخشی از نتایج آزمایش‌های مقـدماتی به‌منظور معرفی عملکرد دستگاه به‌اختصـار ارائـه شـده است.



شکل ۱ المان خاک در حالت: (الف) قبل از ریزشویی، (ب) ریزشویی داخلی و (ج) ریزشویی خارجی



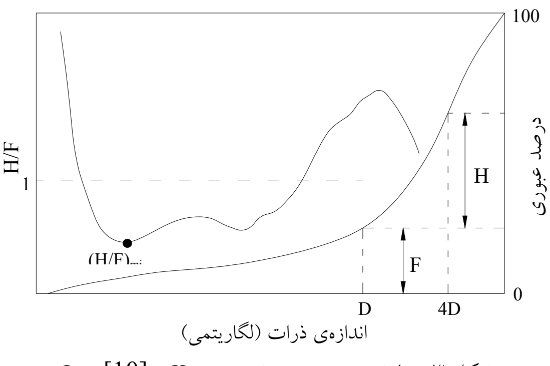
شکل ۲ دانه‌بندی آبرفت‌های ساختگاه برخی از سدهای ایران

روش‌های ارزیابی ناپایداری داخلی خاک

بر پایه‌ی مطالعات آزمایشگاهی، تجارب عملی و روابط نظری، روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی پایداری یا ناپایداری داخلی خاک‌ها ارائه شده‌است.

مهم‌ترین‌های آن‌ها روش Kezdi [9]، روش Kenney و Lau [10] و روش Burenkova [11] می‌باشند. در ادامه روش Kenney و Lau [10] که در این مقاله مورد استفاده است به‌اختصار معرفی می‌گردد.

در روش Kenney و Lau مطابق شکل (۳) در منحنی دانه‌بندی، اندازه‌های D و ٤D معین می‌گردد. درصد ذرات ریزتر از D با F و درصد ذرات ریزتر از ٤D و درشت‌تر از D با H نمایش داده می‌شود. این روند برای کلیه‌ی مقادیر D، در محدوده‌ی عبوری صفر تا ٪٤۰، انجام می‌شود و نمودار تغییرات H/F رسم می‌گردد. در صورتی که این نمودار برای مصالح با دانه‌بندی عریض ($C_u>۳$) در محدوده‌ی $F \leq ٪۲۰$ و برای دانه‌بندی‌های کم‌عرض ($C_u<۳$) در محدوده‌ی $F \leq ٪۳۰$ بالای خط H/F=۱ قرار گیرد، خاک پایدار داخلی و در غیر این‌صورت ناپایدار داخلی است. اندازه $(H/F)_{min}$ نشانه‌ای از میزان ناپایداری داخلی خاک مورد بررسی است و به‌عنوان شاخص پایداری (Stability Index) معرفی می‌گردد.



شکل ۳ نمایش ترسیمی روش Kenney و Lau [10]

سامانه‌ی آزمایشگاهی

مهم‌ترین ویژگی‌های سامانه‌ی آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده عبارتند از:

۱- امکان آزمایش تراوش، با جهت جریان رو به بالا یا پایین
۲- توانایی آزمایش مصالح با اندازه‌ی واقعی ذرات
۳- کنترل دقیق گرادیان هیدرولیکی (از مقادیر کم تا زیاد) جریان
٤- اعمال و کنترل دقیق سربار مؤثر بر نمونه به همراه امکان اندازه‌گیری دقیق تنش مؤثر در هر تراز از خاک
۵- اندازه‌گیری تغییرات طول نمونه که معرف تغییرات کرنش حجمی و تخلخل خاک است
٦- تعیین دقیق تغییرات گرادیان‌های هیدرولیکی موضعی در هر تراز از نمونه خاک
۷- امکان اندازه‌گیری جریان عبوری از نمونه، برای بررسی سرعت تراوش و نفوذپذیری.

دستگاه آزمایش. دستگاه آزمایش طراحی شده (شکل ٤)، متشکل از محفظه‌ی تراوش بزرگ مقیاس، تجهیزات بارگذاری محوری، تجهیزات تأمین و کنترل جریان آب و تجهیزات رایانه‌ای کنترل و ثبت اطلاعات است.

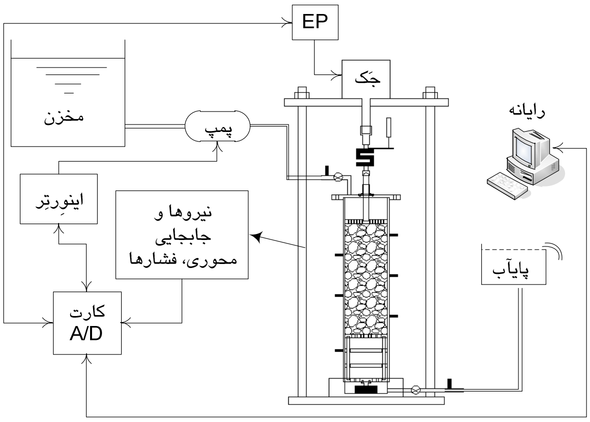
محفظه‌ی اصلی دستگاه شامل استوانه‌ای از جنس پلکسی‌گلس (Plexiglas) با ارتفاع ۱ متر، قطر داخلی ۲۳۰ میلی‌متر و ضخامت جداره ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. محفظه به‌وسیله‌ی ٦ میله‌ی کششی در بین درپوش بالایی و کف (هر دو از جنس آلومینیم) محکم می‌شود و وجود واشرهای حلقوی (O-ring) آب‌بندی را فراهم می‌کند. بر روی درپوش بالایی شیر ورودی و شیر هواگیری و در کف دستگاه شیر خروجی تعبیه شده‌اند.

در شکل (۵) جزئیات بیش‌تری از محفظه‌ی تراوش ارائه شده است. تجهیزات بارگذاری محوری متشکل از قاب عکس‌العمل بارگذاری و جَک پنوماتیک دوطرفه (کورس ۱٦۰ میلی‌متر) با حداکثر نیروی محوری قابل اعمال ۵۰kN است. عملکرد جَک توسط عملگر الکتروپنوماتیک (EP) و نرم‌افزار رایانه‌ای به‌صورت حلقه‌ی بسته کنترل می‌گردد. سربار توسط میله‌ی بارگذاری (از جنس فولاد زنگ‌نزن با قطر ۳۰ میلی‌متر) و صفحه‌ی بارگذاری به سطح نمونه خاک اعمال می‌شود. میله‌ی بارگذاری از میان بوشینگ و کاسه نمد تعبیه شده بر روی درپوش دستگاه هدایت می‌شود. اصطکاک ناشی از عبور میله‌ی بارگذاری از میان سیستم بوشینگ و کاسه نمد برابر با ۰/۰۳ kN، معادل تنش ۰/۷ kPa در سطح نمونه می‌باشد که با عنایت به دقت اندازه‌گیری‌های نیروی محوری قابل صرف‌نظر کردن است.

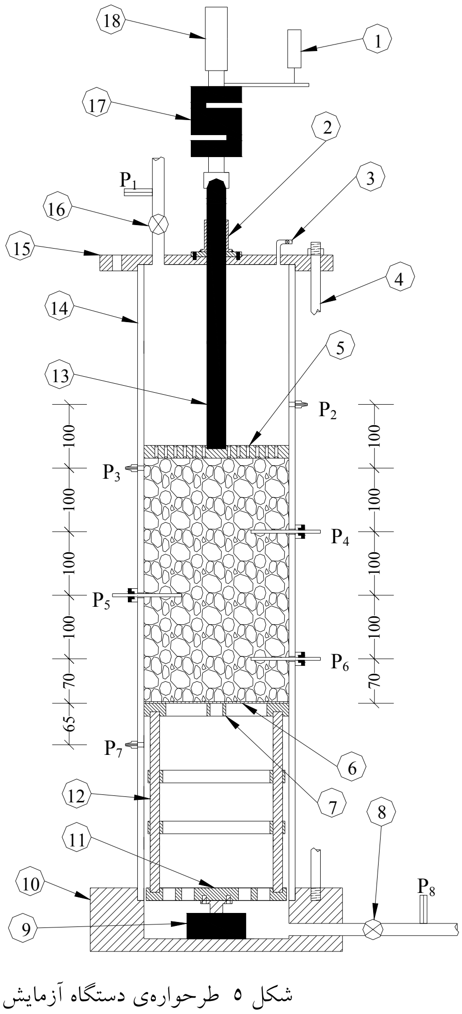
صفحه‌ی بارگذاری از جنس آلومینیم (ضخامت ۲۰ میلی‌متر) و شامل تعداد ۱۲۰ سوراخ ۵ میلی‌متر و شیارهای متحدالمرکز به‌صورت متقارن است که برای سهولت و یکنواختی جریان آب تعبیه شده‌اند. مطابق شکل (٦) برای جلوگیری از ایجاد مسیرهای ترجیحی جریان در محل تماس نمونه خاک و محفظه، و هدایت هرچه بیش‌تر جریان به داخل نمونه، در پیرامون صفحه‌ی بارگذاری از لاستیک آب‌بند (Packing) استفاده شده است. لاستیک آب‌بند با جداره‌ی محفظه اصطکاکی برابر با ۰/۱۵ kN، معادل تنش ۳/٦ kPa در سطح نمونه، ایجاد می‌کند که در محاسبات در نظر گرفته می‌شود.

نمونه‌سازی خاک درون محفظه، بر روی یک مِش که روی قاب عکس‌العمل تحتانی مستقر است، انجام می‌شود. مطابق شکل (۵) وظیفه‌ی اصلی قاب عکس‌العمل تحتانی انتقال نیروها (شامل وزن نمونه، وزن میله‌ی بارگذاری و صفحات، سربار اعمال شده و هرگونه نیروی هیدرودینامکی جریان) به نیروسنج پایین است. به‌علاوه، قاب مذکور با فراهم کردن فضایی آزاد در زیر نمونه، فرسایش و خروج ذرات و مشاهده‌ی چشمی فرسایش را ممکن می‌سازد. قاب عکس‌العمل تحتانی به ارتفاع کل ۳۳۰ میلی‌متر متشکل از چهار صفحه‌ی آلومینیمی (ضخامت ۲۰ میلی‌متر) و چهار ستون فولادی (قطر ١٦ میلی‌متر) است. مطابق شکل (٦)، برای جلوگیری از فرسایش ذرات از جداره‌ها در اطراف صفحه‌ی بالایی قاب (که در زیر

مِش و نمونه خاک قرار می‌گیرد) لاستیک آب‌بند مشابه با صفحه‌ی بارگذاری تعبیه شده است. تجهیزات تـأمین جریـان آب متشـکل از پمـپ دورانـی بـا تـوان ۲/۲ کیلووات و مخزن ایستآبی با ظرفیت ۳۰۰ لیتر اسـت. با استفاده از اینورتِر (Inverter) و نـرم‌افـزار رایانـه‌ای، موتور به‌صورت حلقه بسته کنتـرل مـی‌شـود و تنظـیم دقیق جریان و گرادیان‌های هیدرولیکی اعمالی به نمونه در طول آزمایش صورت می‌پذیرد.



شکل ٤ طرحواره سامانه آزمایشگاهی ریزشویی



اجزای دستگاه:
۱) LVDT، ۲) بوشینگ و کاسه نمـد، ۳) شـیر هواگیری (٦/۵ میلی‌متـر)، ٤) میلـه کششـی (٦ عدد)، ۵) صفحه بارگذاری، ٦) مِش زیر نمونه، ۷) صفحه‌ی زیر نمونه، ۸) شـیر خروجـی (۱۹ میلی‌متر)، ۹) نیروسنج پایین، ۱۰) کف دستگاه، ۱۱) صــفحه‌ی پــایین فــریم، ۱۲) قـــاب عکس‌العمل تحتانی، ۱۳) میله‌ی بارگذاری، ١٤) محفظه‌ی پلکسی‌گلس، ۱۵) درپـوش دسـتگاه، ۱٦) شــیر ورودی (۱۲/۷ میلــی‌متــر)، ۱۷) نیروسنج بالا، ۱۸) میله‌ی جَک پنوماتیـک و P_i اتصال پیزومتری شماره‌ی i.

شکل ۵ طرحواره‌ی دستگاه آزمایش ریزشویی (اندازه‌ها بر حسب میلی‌متر)

برای ثابت بودن بلندای آبی در خروجی محفظه‌ی تراوش، مسیر خروج جریان به پایاب متصل است (شکل ٤).

ابزار دقیق. برای حصول دقیق تنش مؤثر در ترازهای مختلف نمونه، هرگونه تغییراتی در نیروی محوری به‌واسطه‌ی تأثیر اصطکاک جداره‌ی دستگاه آزمایش با نمونه باید مد نظر قرار گیرد. بنابراین اندازه‌گیری نیروی محوری در بالا و پایین نمونه صورت می‌گیرد. مطابق شکل (۵) نیروسنج بالا (ظرفیت ۵۰ kN) بر روی میله‌ی بارگذاری و بیرون از محفظه‌ی دستگاه آزمایش مستقر شده است در حالی‌که نیروسنج پایین (ظرفیت ۱۰۰ kN) از نوع ضد آب است و داخل دستگاه، متصل به کف و در زیر قاب عکس‌العمل تحتانی قرار دارد. براساس قدرت تفکیک نیروسنج‌های به‌کاررفته، تنش‌های اندازه‌گیری‌شده در نمونه دارای دقت ۰/۷ kPa± خواهند بود.

طول نمونه خاک درون محفظه دستگاه، بر اثر (الف) نشست تحت اثر سربار اعمال شده و (ب) نیروی هیدرودینامیکی جریان آب تغییر می‌نماید. به‌علاوه انتظار می‌رود که بر اثر وقوع ریزشویی و فرسایش ذرات، تغییراتی در تخلخل و حجم نمونه روی دهد که به‌صورت تغییرات طول نمونه قابل اندازه‌گیری است. جابه‌جایی محوری نمونه به‌وسیله‌ی جابه‌جایی‌سنج (LVDT)، با ظرفیت ۱۰۰ mm و دقت ۰/۰۵ mm±، مستقر بر روی میله‌ی بارگذاری اندازه‌گیری می‌شود.

اندازه‌گیری دقیق فشار آب منفذی برای تعیین بلندای آبی در ترازهای مختلف نمونه خاک و هم‌چنین برای کنترل جریان تراوش مورد نیاز است. مطابق شکل (۵) بر روی بدنه‌ی محفظه‌ی دستگاه در ترازهای معین اتصالات پیزومتری تعبیه شده است که به‌وسیله‌ی شلنگ به سنسورهای فشار متصل می‌گردند. در ترازهای بالا و پایین نمونه خاک، P_2، P_3 و P_7، اتصال پیزومتری از جنس پلکسی‌گلس است و فشار آب را در جداره داخلی محفظه اندازه‌گیری می‌کند. برای ترازهایی که نمونه خاک مستقر است، P_4، P_5 و P_6، فشار آب منفذی لایه‌ی جداره‌ای بین نمونه و محفظه معرف فشار داخل خاک نخواهد بود. به همین منظور پیزومتر خاصی، متشکل از پیچ فلزی به قطر ۵ میلی‌متر و طول ۱۲۰ میلی‌متر که درون آن سوراخ ۲ میلی‌متری ایجاد شده است، به‌کار می‌رود. پس از ساخت نمونه، پیچ عنوان شده از میان اتصال پیزومتری پیچانده می‌شود و حدود ٦۰ میلی‌متر به درون خاک نفوذ می‌کند. بدین ترتیب فشار انتهای (نوک) پیزومتر (پیچ) از طریق شلنگ به سنسور فشار منتقل می‌شود و قرائت صحیحی از فشار داخل نمونه خاک حاصل می‌گردد. در شکل (۷) تصویری از این‌گونه پیزومترها نشان داده شده‌است. سنسورهای فشار مورد استفاده از نوع سنسور فشار کل (Total Pressure Transducer) با ظرفیت صفر تا ٤۰۰ kPa و دقت ۱/۲ kPa± می‌باشند.




(الف) (ب)

شکل ٦ (الف) لاستیک آب‌بند در اطراف صفحه‌ی بارگذاری و (ب) قاب عکس‌العمل تحتانی




(الف) **(ب)**

شکل ۷ (الف) اتصال پیزومتری برروی بدنه محفظه دستگاه و (ب) پیزومتر فلزی فرورفته در داخل نمونه خاک

نرخ حجمی جریان (دبی) خروجی در پایاب با

استفاده از استوانه‌ی مدرج در فواصل زمانی منظمی در طول آزمایش اندازه‌گیری می‌شود.

تجهیزات فرمان‌یار و کنترل مورد استفاده ساخت داخل کشور می‌باشد. این تجهیزات دارای ١٦ کانال ورودی آنالوگ (١٦ بیت)، ٤ کانال خروجی آنالوگ (١٢ بیت) و سرعت نمونه‌گیری ۵۰ نمونه بر ثانیه است. با استفاده از نرم‌افزارهای رایانه‌ای کنترل، که منحصراً برای مقاصد عملیاتی دستگاه آزمایش ریزشویی نوشته شده‌اند، کنترل‌ها و جمع‌آوری اطلاعات به‌صورت حلقه بسته صورت می‌گیرد.

روش انجام آزمایش

با استفاده از دستگاه ساخته شده و امکانات موجود، مراحل انجام آزمایش ریزشویی به شرح زیر است؛

نمونه‌سازی. با توجه به این‌که خاک‌های ناپایدار داخلی، اعم از دانه‌بندی‌های گسترده یا گسسته، به‌شدت در معرض جداشدگی دانه‌ها هستند، نمونه‌سازی آن‌ها بسیار دشوار است. به همین دلیل لازم است که نمونه‌ی مورد نظر به‌گونه‌ای درون محفظه‌ی دستگاه آزمایش چیده شود. برای این منظور نمونه خاک در ۱۰ لایه‌ی جدا مخلوط و آماده می‌شود که دانه‌بندی هر کدام مطابق با دانه‌بندی هدف است. هر لایه به‌میزان مشخصی (حدود ۲ تا ٦٪ بسته به دانه‌بندی) مرطوب می‌گردد. وجود رطوبت در بین دانه‌ها تا حدودی باعث ایجاد مکش می‌شود و امکان جداشدگی دانه‌ها را کاهش می‌دهد. سپس محتویات هر ظرف (لایه) به چهار بخش تقریباً مساوی تقسیم می‌گردد. سطح مقطع دستگاه به‌صورت فرضی به چهار قطاع تقسیم می‌شود و مصالح هر بخش درون یک قطاع قرار می‌گیرد. پس از قراردهی، سطح هر لایه به‌وسیله‌ی دست به‌آرامی و با دقت صاف می‌شود. با این روش اطمینان از توزیع یکنواخت و هم‌گن تمامی اندازه‌های ذرات وجود دارد.

اعمال سربار. پس از ساخت نمونه و قبل از اشباع‌سازی، سربار مورد نظر، σ'_{Tav}، به‌صورت تدریجی و آرام بر نمونه اعمال می‌شود. اعمال تدریجی سربار (در مدت زمان حدود ۲/۵ تا ٤ ساعت بسته به میزان سربار) موجب می‌گردد که نمونه فرصت نشست داشته باشد و تغییرات محتمل در آرایش دانه‌های خاک به‌آرامی صورت پذیرد.

اشباع‌سازی. در مرحله‌ی اشباع‌سازی نمونه، مشابه روش استاندارد [12] برای آزمایش‌های نفوذپذیری، جریان آب با جهت رو به بالا از پایین دستگاه (شیر خروجی) وارد می‌شود. بدین ترتیب هوای موجود در دستگاه و نمونه و از شیر هواگیری (شکل ۵) خارج می‌شود. پس از رسیدن سطح آب به تراز هر کدام از اتصالات پیزومتری، شلنگ مربوط به پیزومتر با ورود آب هواگیری می‌شود و به اتصال پیزومتری متصل می‌گردد. برای حصول اطمینان از اشباع شدن کامل (در حد امکان) نمونه و جلوگیری از هرگونه حرکت ذرات در حین اشباع‌سازی، نرخ جریان ورودی به دستگاه بسیار پایین (در حد ٤ تا $6\ cm^3/s$) است و زمان اشباع‌سازی حدود ۳ ساعت به‌طول می‌انجامد.

مرحله‌ی تراوش. جریان تراوش از نوع کنترل گرادیان است. پس از اعمال تنش مؤثر (σ'_{Tav}) و اشباع‌سازی، طول نمونه از مقدار اولیه L_0 تغییر می‌کند. این تغییرات در زمان‌های مختلف با ΔL_t بیان می‌شود. گرادیان هیدرولیکی توسط مقدار گرادیان مسیر یا i_{18} به‌صورت زیر تنظیم می‌گردد:

$$i_{18} = \frac{h_1 - h_8}{L_t} \qquad (1)$$

در رابطه‌ی اخیر:

i_{18}: گرادیان مسیر

h_1: بلندای آبی کل در تراز پیزومتر ۱ (P_1)

h_8: بلندای آبی کل در تراز پیزومتر ۸ (P_8)

L_t: طول نمونه در زمان t با دانستن این‌که $L_t=L_0-\Delta L_t$

نظر به این‌که پیزومتر P_8 مستقیماً به پایاب متصل است، مقدار h_8 تابعی از سرعت خروج جریان در تراز پایاب است و برای غالب آزمایش‌ها (مگر در مواردی که سرعت‌های جریان بسیار بالا باشد) مقدار h_8 تغییرات اندکی دارد.

مقدار بلندای آبی h_1 توسط موتور و از طریق اینورتر تغییر می‌کند. در صورتی که تغییری در طول نمونه L_t روی دهد، سیستم کنترل به‌صورت حلقه‌بسته مقدار h_1 را تنظیم می‌کند تا گرادیان اعمال شده ثابت باقی بماند. برای هرگام از تغییر گرادیان هیدرولیکی (افزایش یا کاهش) تنظیم فشار h_1 توسط دستگاه و بر اساس (۱) صورت می‌گیرد.

اندازه‌گیری‌ها و محاسبات. پس از اتمام مرحله‌ی تراوش و پایان آزمایش، نمونه خاک برجای مانده در چهار لایه بین پیزومترها استخراج شده و دانه‌بندی آن‌ها تعیین می‌گردد. هر لایه با L_{jk} نشان‌داده می‌شود که معرف لایه‌ی بین پیزومتر P_j تا P_k است. با دانستن بلندای آبی در پیزومترها (h_i) گرادیان‌های موضعی، i_{jk}، در لایه‌های خاک از رابطه‌ای مشابه (۱) قابل محاسبه هستند. در کنار سربار اعمال شده، σ'_{Tav}، تنش در سطح پایین نمونه، σ'_B، نیز در هر لحظه معین می‌شود. با اندازه‌گیری نشست لحظه‌ای نمونه، ΔL_t، کرنش محوری به‌صورت $\varepsilon_a=\Delta L_t/L_0$ محاسبه می‌شود. از آن‌جایی که سطح مقطع نمونه به‌واسطه‌ی محصور بودن در محفظه‌ی دستگاه ثابت است، کرنش محوری بیانگر کرنش حجمی، ε_V، نمونه است. اندازه‌گیری نرخ حجمی جریان خروجی منجر به تعیین سرعت جریان در نمونه و در صورت نیاز محاسبه‌ی نفوذپذیری و تغییرات آن می‌شود.

مشخصات مصالح و دانه‌بندی خاک‌ها

مصالح دانه‌ای مورد استفاده، رودخانه‌ای با دانه‌های گردگوشه تا نسبتاً گردگوشه هستند. پس از شستشوی مصالح و اطمینان از عدم وجود ذرات ریزدانه، دانه‌ها در ۱۳ دسته بین الک‌های استاندارد تفکیک می‌شوند و به نسبت مورد نیاز برای تأمین دانه‌بندی‌های مورد آزمایش مخلوط می‌گردند. برای بخش ریزدانه (عبوری از ۰/۰۷۵ میلی‌متر) از پودر سیلیس تجاری، که به‌روش فرآیند سنگ شکن تولید شده است، استفاده گردید. پودر سیلیس غیرچسبنده است و شاخص خمیری (PI) آن برابر با صفر می‌باشد.

در آزمایش‌های مقدماتی چهار خاک مورد آزمایش قرار گرفته‌اند که منحنی دانه‌بندی آن‌ها مطابق شکل (۸) است. حداکثر اندازه تمامی خاک‌ها به ۲۵/٤ میلی‌متر محدود است (طبق توصیه استاندارد [12] حداکثر اندازه دانه‌ها باید ۱/۸ تا ۱/۱۲ قطر محفظه باشد) و شکلی مشابه پی‌های آبرفتی معرفی شده در شکل (۲) دارند. در جدول (۱) مشخصات دانه‌بندی خاک‌ها ارائه شده و جدول (۲) ارزیابی پایداری/ناپایداری داخلی خاک‌ها به‌روش Kenney و Lau [۱۰] و مقادیر شاخص پایداری را بیان می‌دارد.

جدول ۱ مشخصات دانه‌بندی خاک‌های مورد آزمایش

مشخصه	نمونه خاک			
	S1	S2	S3	S4
D_{15} (mm)	۰/۰۹۹	۰/۵۹۵	۱/۱۰	۰/۸۸۲
D_{85} (mm)	١٦/٨٦	۲۰/٤۷	۱۵/٦۳	۹/۵۲
D_{max} (mm)	۲۵/٤	۲۵/٤	۱۹/۰۵	۱۲/۷
%<0.075mm	۱۳	۸	۵	۳
C_u	۱٤۹/٦	۸٦/۹	۲۷/۵	١٦/۹
C_c	۸/۷	۱٤/۷	۵/۰	۵/۰
*USCS	GM	GP-GM	GP	GP

* Unified Soil Classification System (سیستم طبقه‌بندی متحد خاک)

جدول ۲ ارزیابی پایداری/ناپایداری داخلی خاکهای مورد آزمایش به روش Kenney و Lau [10]

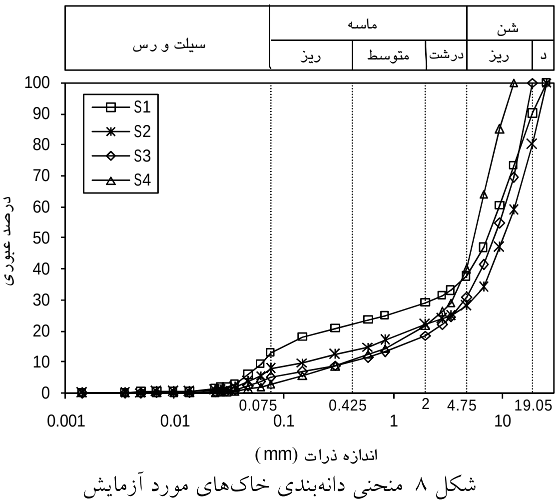
مشخصه	نمونه خاک			
	S1	S2	S3	S4
ارزیابی	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
$(H/F)_{min}$	۰/۲۷	۰/٤۷	۰/٦٦	۰/۸۹

آزمایش‌ها و نتایج

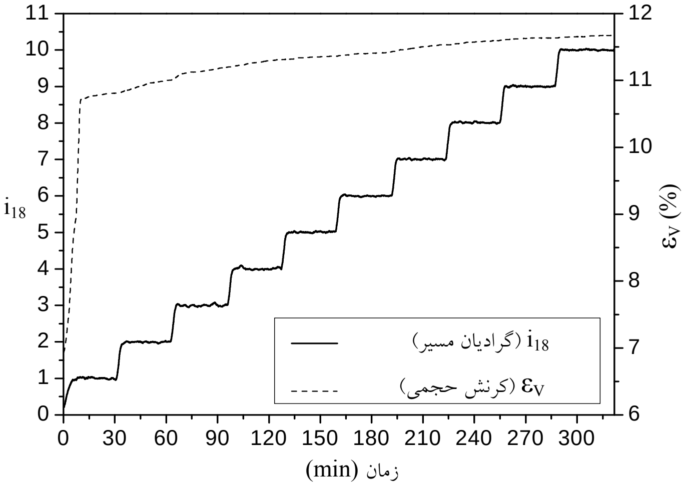
آزمایش‌ها. هر چهار نمونه خاک تحت سربار σ'_{Tav}=۳۰kPa مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. اندازه‌ی مِش خروجی (زیر نمونه)، مدت زمان تراوش و مشخصات نمونه‌ها در جدول (۳) ارائه شده است. گرادیان هیدورلیکی مسیر (i_{18}) اعمال شده به نمونه از مقدار ۱ تا ۱۰ به‌صورت پله‌ای افزایش یافته و هر پله گرادیان مدت ۳۰ دقیق به خاک اعمال شده است. شکل (۹) نمونه‌ای از تغییرات گرادیان هیدرولیکی و نیز کرنش حجمی در آزمایش بر روی خاک S1 را نشان می‌دهد.

گرادیان‌های اعمال شده در طول آزمایش، از مقادیر معمول گرادیان‌های تراوش در پی و بدنه سدهای خاکی بیشتر است [6] و زمان اندک آزمایش در قیاس با طول عمر مفید سد را به‌صورت غیرمستقیم جبران می‌کند. با توجه به این‌که هدف اصلی این تحقیق مهیا نمودن شرایط وقوع ریزشویی خارجی و فرسایش هرچه بیش‌تر ذرات خاک بوده است، سطح سربار (σ'_{Tav}=۳۰kPa) به‌نحوی انتخاب گردید تا تأثیرات محتمل سربارهای زیاد در کاهش میزان فرسایش مرتفع گردد. در تحقیقات مشابه قبلی در رابطه با ریزشویی هرجا بررسی مقدار فرسایش مورد نظر بوده، از سطوح سربار مشابه استفاده شده است (به‌عنوان مثال ۱۰kPa [13] تا ۲۵kPa [14]). اندازه چشمه‌ی مِش مستقر در زیر نمونه به‌نحوی تعیین می‌شود که اجازه‌ی ریزشویی خارجی از نمونه‌ی مورد آزمایش را بدهد. بر این اساس برای خاک‌های مورد آزمایش اندازه‌ی چشمه مِش معادل اندازه‌ی عبوری ۴۰٪ تا ٤۷٪ در منحنی دانه‌بندی است. در تحقیقات گذشته نیز مِش‌هایی با اندازه مشابه [14] و حتی تا حدود ۷۲٪ عبوری در منحنی دانه‌بندی [15] توسط محققان به‌کار رفته است. در مسایل واقعی ممکن است به‌دلیل لایه‌بندی خاک‌های طبیعی ذرات فرسایش‌یافته در ریزشویی، خاک ناپایدار داخلی را ترک نکنند و نهایتاً ریزشویی داخلی روی دهد. در چنین شرایطی در پایین‌دست خاک ناپایدار داخلی تدریجاً کاهش نفوذپذیری توأم با افزایش فشار آب منفذی حادث می‌شود. طی این پیشامد توزیع مجدد فشار منفذی می‌تواند به‌نوبه‌ی خود باعث ریزشویی یا فرسایش عقب‌رونده گردد.

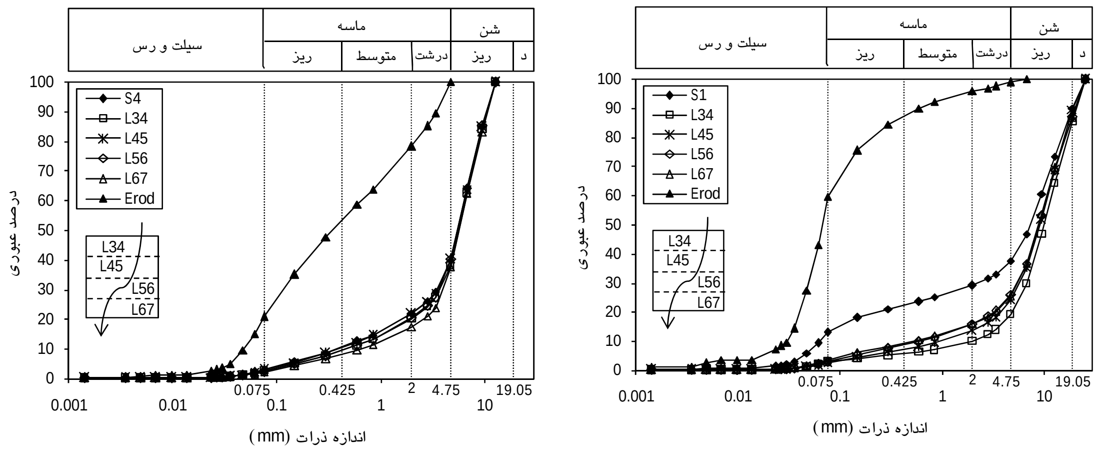
نتایج. در جدول (٤) نتایج آزمایش‌ها، در قالب میزان فرسایش و تغییرات کرنش حجمی و تخلخل، ارائه شده است. از اصلی‌ترین نتایج تعیین میزان فرسایش، F_{erod}، در ریزشویی و تشخیص پایداری/ناپایداری داخلی دانه‌بندی است. در شکل‌های (۱۰-الف) و (۱۰-ب) دانه‌بندی لایه‌های مختلف نمونه پس از آزمایش برای خاک‌های S1 و S4 ارائه شده است.



شکل ۸ منحنی دانه‌بندی خاک‌های مورد آزمایش



شکل ۹ تغییرات گرادیان مسیر و کرنش حجمی طی آزمایش برروی خاک S1 تحت σ'_{Tav}=۳۰kPa



شکل۱۰ دانه‌بندی لایه‌های مختلف نمونه پس از آزمایش تحت σ'_{Tav}=۳۰kPa برروی
(الف) خاک S1 و (ب) خاک S4

جدول ۳ مشخصات آزمایشها تحت σ'_{Tav}=۳۰kPa

مشخصه	نمونه خاک			
	S1	S2	S3	S4
w (%)	٤/٥	٣/٥	٢/٩	٢/٧
مِش خروجی (mm)	٦/٧٣	٩/٥٢	٦/٧٣	٤/٧٥
L_0 (mm)	٣٨٣	٣٧٥	٣٨٤	٣٨٢
e_0 (%)	٤٥/٠	٤١/٤	٤٥/٤	٤٤/٦
مدت آزمایش (min)	٣٢٢	٣١٣	٣١٩	٣٣١

توضیحات: w میزان رطوبت نمونه‌سازی
L_0 و e_0 به‌ترتیب طول و تخلخل نمونه‌سازی

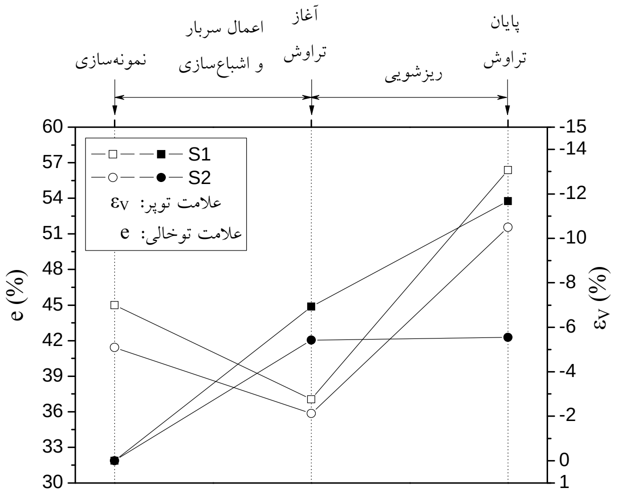
جدول ٤ نتایج آزمایش تحت σ'_{Tav}=۳۰kPa

مشخصه	نمونه خاک			
	S1	S2	S3	S4
ارزیابی	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	پایدار
F_{erod} (%)	۱۸/٤	۱۱/۹	٦/۳	۱
$^{+*}\Delta\varepsilon_V$ (%)	٤/٧٤	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۲٦
$^{\$*}\Delta e$ (%)	۱۹/۳	۱۵/۷	٦/٦	−۰/۸

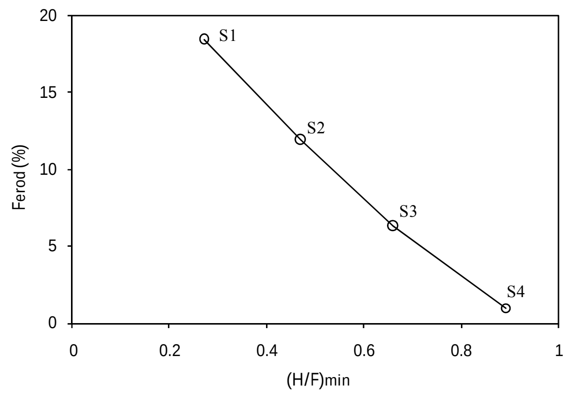
*: مقادیر گزارش شده برای مرحله‌ی تراوش (ریزشویی)

+: کرنش حجمی مثبت نشانه کاهش حجم

$: افزایش تخلخل مثبت و کاهش تخلخل منفی



شکل ۱۱ تغییرات کرنش حجمی و تخلخل نمونه در مراحل مختلف آزمایش برروی خاک‌های S1 و S2 تحت σ'_{Tav}=۳۰kPa



شکل ۱۲ تغییرات درصد فرسایش، F_{erod} ، بر حسب شاخص پایداری، $(H/F)_{min}$ ، در آزمایش برروی خاک‌ها تحت σ'_{Tav}=۳۰kPa

دانه‌بندی لایه‌های مختلف خاک S1 پس از آزمایش از دانه‌بندی اولیه به‌مراتب درشت‌تر شده که نشان از فرسایش زیاد، F_{erod}=۱۸/٤٪، و ریزشویی خارجی شدید از نمونه خاک است. مطابق شکل (۱۰–الف) بیش‌ترین مقدار فرسایش از لایه‌ی L_{34} روی داده است. به بیان دیگر بر اثر ریزشویی ذرات ریز لایه‌ی L_{34} به‌درون و از میان لایه‌های زیرین فرسایش یافته‌اند. برای خاک S4 دانه‌بندی پس از آزمایش لایه‌های مختلف به دانه‌بندی اولیه نمونه بسیار نزدیک بوده و فرسایش اندکی، F_{erod}=۱٪، روی داده که عمدتاً مربوط به لایه‌ی L_{67}، لایه‌ی مجاور مِش خروجی، است. بدین ترتیب در خاک S4 ریزشویی روی نداده و بر خلاف پیش‌بینی روش Kenney و Lau [۱۰] خاک پایدار داخلی است.

در شکل (۱۱) تغییرات کرنش حجمی، ε_v، و تخلخل، e، در طی مراحل مختلف آزمایش روی خاک‌های S1 و S2 نشان داده شده است. قابل انتظار است که در مراحل اعمال سربار و اشباع‌سازی، نمونه خاک متراکم شود و به‌دلیل کاهش حجم، تخلخل نیز کم شود. در خلال وقوع ریزشویی، خاک S1 دچار کاهش حجم می‌شود و تغییرات کرنش حجمی حین ریزشویی، $\Delta\varepsilon_v$، برابر با ٤/۷٤٪ به‌دست می‌آید، اما به‌دلیل فرسایش ذرات از نمونه، تخلخل خاک ۱۹/۳٪ افزایش می‌یابد.

برای خاک S2 تغییر حجم نمونه طی ریزشویی ناچیز است، اما فرسایش ذرات از توده‌ی خاک باعث افزایش تخلخل به‌میزان ۱۵/۷٪ شده است. این نتایج نشان می‌دهد که بر اثر ریزشویی، همواره ساختار خاک متخلخل‌تر می‌گردد و در نتیجه باعث تغییرات قابل ملاحظه‌ای در رفتار تنش–کرنش و تغییرشکل‌پذیری خاک می‌شود. خاک S4 که پایدار داخلی است، طی تراوش نمونه به‌میزان اندکی کاهش حجم می‌دهد، اما به‌دلیل عدم وقوع ریزشویی، ذرات از توده خاک فرسایش نمی‌یابند، بنابراین کاهش حجم همراه با کاهش میزان تخلخل نمونه است.

در شکل (۱۲) میزان فرسایش از نمونه‌های مورد آزمایش بر حسب شاخص پایداری، $(H/F)_{min}$، ارائه شده است. بر این اساس، افزایش شاخص پایداری، که متناظر با نزدیک شدن خاک به شرایط پایدار داخلی است، موجب کاهش میزان فرسایش از خاک، F_{erod}، می‌شود.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

توجه اصلی مقاله حاضر به معرفی دستگاه آزمایش پیشرفته و بزرگ مقیاس برای مطالعه‌ی فرسایش داخلی و ریزشویی می‌باشد. ضمن تشریح توانمندی‌های عملکردی و مختصات ویژه‌ی سامانه‌ی آزمایشگاهی، نظیر مقیاس بزرگ و امکان اندازه‌گیری دقیق تنش مؤثر و گرادیان در ترازهای مختلف نمونه، راهکار مطالعه‌ی آزمایشگاهی پدیده ریزشویی مورد بحث قرار گرفت.

با استناد به‌نتایج آزمایش‌های مقدماتی صورت‌گرفته، می‌توان نتایج اصلی زیر را برشمرد:

۱) پایداری/ناپایداری داخلی خاک‌ها صرفاً با استفاده از روش‌های ارزیابی موجود قابل تشخیص نیست و لازم است وقوع ریزشویی در آزمایش تراوش، تحت تأثیر عوامل هیدرومکانیکی، نظیر سربار مؤثر و جریان تراوش، بررسی گردد.

۲) شاخص پایداری محاسبه‌شده از روش Kenney و Lau بیانگر میزان فرسایش در ریزشویی است و به‌عبارت دیگر تغییرات آن مبین شدت امکان وقوع ریزشویی در خاک می‌باشد.

۳) وقوع ریزشویی با تغییر دادن دانه‌بندی و تخلخل توده خاک، باعث تغییرات اجتناب‌ناپذیر و تأثیرگذاری در رفتار تنش–کرنش و تغییرشکل‌پذیری خاک خواهد شد.

مراجع

1. Foster, M., Fell, R. and Spannagle, M., "A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping", *Canadian Geotechnical Journal,* 37, pp. 1025-1061, (2000).
2. Soroush, A., Miri Disfani, M. and Tabatabaie Shourijeh, P., "Potential of internal instability in alluvial sediments", 59th Canadian Geotechnical Conference, 8-10 October 2006, Vancouver, Canada, pp. 1156-1163, (2006).
3. Soroush, A., Tabatabaie Shourijeh, P. and Miri Disfani, M., "A laboratory study on some factors effecting suffusion in soils", *Proceedings of the 13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering,* 10-14 December 2007, Kolkata, India, (2007).
4. سروش، عباس، طباطبایی شوریجه، پیلتن و میری دیسفانی، مهدی، "شناسایی پدیده‌ی ریزشویی و خاک‌های ناپایدار داخلی"، کمیته‌ی ملی سدهای بزرگ ایران، ص. ۷۵، (۱۳۸۹).
5. Fannin, R. J. and Moffat, R., "Observations on internal stability of cohesionless soils", Géotechnique, 56(7), pp. 497-500, (2006).
6. Wan, C.F. and Fell, R., "Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* ASCE, 134 (3), pp. 401-407, (2008).
7. Cividini, A., Bonomi, S., Vignati, G.C. and Gioda, G., "Seepage-Induced Erosion in Granular Soil and Consequent Settlements", *International Journal of Geomechanics,* ASCE, 9(4), pp. 187-194, (2009).
8. میری‌دیسفانی، مهدی، "مطالعه‌ی آزمایشگاهی ناپایداری داخلی خاک‌ها"، رساله‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۸۵).
9. Kézdi, Á., "Increase of protective capacity of flood control dikes (in Hungarian)", Department of Geotechnics, Technical University of Budapest, Report No. 1, (1969).
10. Kenney, T.C. and Lau, D., "Internal stability of granular filters: Reply", *Canadian Geotechnical Journal,* 23, pp. 420-423, (1986).
11. Burenkova, V.V., "Assessment of suffosion in non-cohesive and graded soils", Proceedings, the First International Conference "Geo-Filters", Karlsruhe, Germany, 20–22 October 1992, Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Brauns, Heibaum & Schuler (eds.), Balkema, Rotterdam, pp. 357-360, (1993).
12. ASTM , "Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head) (D2434-96)", in the Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.09, ASTM Philadelphia, USA, (1996).
13. Kenney, T.C., Lau, D., "Internal stability of granular filters", *Canadian Geotechnical Journal,* 22, pp. 215-225, (1985).
14. Fannin, R.J., Moffat, R., "Observations on internal stability of cohesionless soils", Geotechnique, 56(7), pp. 497-500, (2006).

15. Moffat, R., Fannin, R.J., Garner, S.J., "Spatial and temporal progression of internal erosion in cohesionless soil", *Canadian Geotechnical Journal,* 48, pp. 399-412, (2011).